

Ivana MARTIĆ, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, ivanamartico@gmail.com

Nastia DEGIULI, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, nastia.degiuli@fsb.hr

Ivan MUNIĆ, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, ivan.munic@fsb.hr

ISTRAŽIVANJE UTJECAJA DINAMIČKE OPLAKANE POVRŠINE NA OTPOR POLUDEPLASMANSKE FORME

Sažetak

U radu je definiran utjecaj dinamičke oplakane površine na konačne vrijednosti ukupnog otpora broda poludeplasmanske forme. Dan je prikaz metoda pomoću kojih se s određenom točnošću može odrediti iznos dinamičke oplakane površine pri nekoj brzini. Detaljnije je opisan postupak određivanja oplakane površine modela analizom fotografija bazenskog ispitivanja. Navedeni su i analizirani faktori koji mogu utjecati na netočnost rezultata modelskih ispitivanja. Na temelju nacrt rebara modela, generiran je, pomoću programa Rhino 4.0, 3D model poludeplasmanske forme trupa broda ispitane u Brodarskom institutu u Zagrebu. Analiziran je utjecaj netočnosti određivanja dinamičke oplakane površine na vrijednosti koeficijenta ukupnog otpora modela broda za dvije različite brzine. Dobiveni podaci ekstrapolirani su Froudeovom metodom na brod u naravi kako bi se odredio utjecaj netočnosti određivanja oplakane površine na silu ukupnog otpora broda.

Ključne riječi: dinamička oplakana površina, poludeplasmanska forma, otpor

AN INVESTIGATION INTO THE EFFECT OF DYNAMIC WETTED SURFACE AREA ON THE RESISTANCE OF SEMI-PLANING HULL

Abstract

This paper defines an influence of dynamic wetted surface area on the final values of the total resistance of semi-planing hull. A review of methods, by which dynamic wetted surface area can be determined with certain accuracy at a certain speed, is given. The process of determining wetted surface area by analyzing photos of a model towed in a tank is described in more detail. Factors that can affect inaccuracy of the model towing test results are also listed and analyzed. A 3D semi-planing hull model was generated using Rhino 4.0, based on the body plan of the model towed in Brodarski Institute in Zagreb. The influence of the inaccuracy of the dynamic wetted surface area determination on the total ship resistance coefficient was analyzed for two different speeds. The resulting data were extrapolated by Froude method to full scale ship in order to determine the influence of inaccuracy of determining wetted surface area on the total ship resistance force.

Key words: dynamic wetted surface area, semi-planing hull, resistance

1. Uvod

Otpor trenja je komponenta ukupnog otpora izravno povezana s oplakanom površinom modela odnosno broda. Kod deplasmanskih formi oplakana površina koja se generira pri nekoj brzini obično se ne razlikuje bitno od one na mirnoj vodi, no kod poludeplasmanskih i gliserskih formi oplakana površina se drastično mijenja s porastom brzine. Zato je potrebna što veća točnost prilikom određivanja oplakane površine ispitivanog modela kako bi se što točnije odredio ukupni otpor broda, a samim time i zahtijevana snaga za postizanje određene brzine.

Najuobičajenija metoda koja se koristi je kombinacija analize podvodnih i nadvodnih fotografija bazenskog ispitivanja. Fotografije koje se koriste su fotografije boka modela, pramca i krme te podvodna fotografija. Točnost ove metode ovisi isključivo o vještini i iskustvu osobe koja je provodi. Procijenjena netočnost prilikom određivanja oplakane površine analiziranjem nadvodnih i podvodnih fotografija iznosi 5 % izračunate vrijednosti, što znači da će vrijednost otpora trenja imati netočnost od 0,5 % [1].

2. Metode određivanje oplakane površine

2.1. Određivanje oplakane površine korištenjem 2D fotografija i 3D objekta modela broda

Proces započinje određivanjem vodne linije s fotografija. Vodna linija se određuje na polu automatizirani način odnosno tzv. "live-wire" metodom [2]. "Live-wire" tehnologija koja se naziva još i "pametne škare" tehnologija je segmentacije fotografija i temelji se na algoritmu funkcije najmanje cijene (eng. lowest cost function), Slika 1. Fotografiju je najprije potrebno obraditi tzv. Sobel filtrom [3] koji detektira rubove na slici pomoću gradijenta skalarnog polja intenziteta slike odnosno vektorskog polja koji pokazuje u smjeru najvećeg porasta skalarnog polja. Gradijent dvovarijabilne funkcije (kao što je funkcija intenziteta slike) je 2D vektor u svakoj točki slike opisan derivacijama funkcije u horizontalnom i vertikalnom smjeru.

U svakoj točki fotografije Sobel operator je vektor gradijenta (ili normala na taj vektor) koji je usmjeren prema najvećem mogućem intenzitetu, a duljina vektora pokazuje jačinu promjene nijanse (intenziteta) u tom smjeru. Računalo pronalazi prijelaze između svijetlih i tamnih dijelova fotografije, određuje sam intenzitet tog prijelaza i tako detektira rub i njegovu orijentaciju.

Algoritmom najmanje cijene pronalazi se najkraća udaljenost između dvije točke koje korisnik odredi. Definira se funkcija cijene prelaska linije preko ruba, a različite funkcije rezultirat će različitim najkraćim putovima između točaka te samim time će se i vodna linija razlikovati.

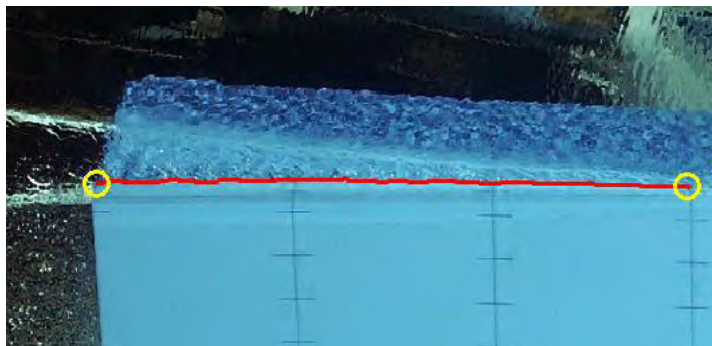


Fig. 2. An example of waterline detection using live-wire [1]

Slika 1. Primjena metode "live-wire" pri određivanju vodne linije [1]

Podvodne fotografije modela prilikom ispitivanja u bazenu od najveće su koristi za određivanje oplakane površine, jer daju kompletnu sliku vodne linije pri određenoj brzini.

No prilikom analiziranja takvih fotografija mogu se pojaviti stanoviti problemi. Primjerice kod nekih oblika brodova (V oblik rebara, brodovi sa zgibom) pri većim brzinama vodna linija se ne vidi jasno zbog mjehurića zraka koji se stvaraju ispod slobodne površine. Isto tako ako je oblik trupa na nekim mjestima vertikaln ili vrlo strm, teško je odrediti točnu visinu vodne linije. U takvom slučaju netočnost očitavanja od jednog pixela može rezultirati velikom devijacijom vodne linije na trupu modela [4]. Zato je vrlo važno uspoređivati fotografije kamere montiranih na različitim pozicijama kako bi se položaj vodne linije što točnije odredio.

Nakon određivanja vodne linije s 2D fotografija, potrebno je projicirati dobivenu vodnu liniju na 3D model. To se postiže kalibracijom kamere odnosno određivanjem točne pozicije i perspektive kamere. Na temelju specifikacija kamere proračunava se matrica projekcije i traže se presjecišta zraka kamere i površine modela. Presjecišta daju koordinate točaka vodne linije čijim se spajanjem dobije oblik vodne linije na površini modela. Nakon što je određen oblik vodne linije površina modela može se podijeliti na podvodni i nadvodni dio, a 3D software određuje iznos oplakane površine.

Modifikacijama parametara "live-wire" metoda može se podesiti tako da odgovara različitim tipovima brodova. No na dijelovima gdje uslijed mjehurića vodna linija nije dovoljno izražena ta metoda neće dati zadovoljavajuće rezultate pa je potrebno primijeniti ručnu metodu.

Pokazalo se da određivanje oplakane površine analiziranjem podvodnih i nadvodnih fotografija daje zadovoljavajuće rezultate u smislu brzine i učinkovitosti procesa, cijene te točnosti.

2.2. Ostale metode određivanja oplakane površine

Cilj je u novije vrijeme razviti metodu koja bi zamijenila ručni dio određivanja oplakane površine s automatskim procesuiranjem fotografija i vizualizacijom rezultata. Razvoj metoda temelji su se na većoj efikasnosti i kraćem potrebnom vremenu rada od dosadašnjeg te većoj ili jednakoj točnosti pri određivanju oplakane površine. Ostale metode su:

- Premaz na modelu (eng. *Responsive coating*) – tanak sloj boje se nanosi uređajem za tlačno prskanje koji iz spremnika usisava zrak i tlači ga na visoki tlak. Tako stlačeni premaz ekspandira u mlaznici u fine čestice usmjerenog mlaza i prekriva podvodni dio modela ili njegove kritične dijelove. Tegljenjem modela kroz bazen ispire se boja s podvodnog dijela modela i na taj način se određuje oplakana površina. Postupak bi trebalo ponoviti za svaku pojedinu brzinu ispitivanja.
- Direktno mjerenje visine vode duž trupa broda (eng. *Direct measurment of water elevation along the ship hull*) – koriste se kondenzatorske trake koje mjere visinu vode duž trupa broda. Princip se temelji na paralelnom spoju kondenzatora tj. na temelju njihove kapacitivnosti. Voda ima manju konstantu električnog otpora od zraka te kondenzatoru koji je pod vodom električni kapacitet raste. Potrebno je postaviti više takvih traka u uzdužnom smjeru i na dno trupa broda ili premazati cijeli trup najprije metalnim premazom pa zatim izolacijskim premazom kako bi u dodiru s vodom nastala kondenzatorska ploča. Same trake mogu utjecati na strujanje tekućine, te ne raspoznaju razliku između same tekućine i vodene maglice. Potrebna je velika točnost u postavljanju traka duž trupa broda što oduzima mnogo vremena, a dodatni nedostatak metode su veliki troškovi.
- Određivanje oplakane površine radarom (eng. *Radar measurement*) – radari daju pouzdana mjerenja, no potrebno je detaljno analizirati fizikalne pojave na kojima se temelji mjerenje odnosno podesiti sustav. Mjerni sustav sastoji se od odašiljača, antene, staze putanje vala i prijemnika te mjeri vrijeme potrebno signalu od trenutka odašiljanja do prijema. Vrijeme prolaska signala kroz tekućinu dulje je od vremena prolaska kroz zrak. Ovisno o tom vremenu, a poznavajući brzinu prolaza signala kroz tekućinu može se

odrediti razina vode. Metoda je u praksi teško provediva zbog problema prilikom instalacije potrebne opreme na postojeću opremu kolica u bazenima za ispitivanje.

- Brojač rešetkastih ćelija (eng. *Grid cell counter*) – metoda se temelji na označavanju rešetkastih ćelija jednakih površina na modelu ili punih polja različite boje poput šahovske ploče. Procesuiranjem podvodnih fotografija, te preciznim radom uz pomoć mjernih instrumenata moguće je odrediti broj ćelija pod vodom odnosno oplakanu površinu. No označavanje polja jednakih dimenzija dugotrajan je i skup proces.

3. Mogući izvori grešaka prilikom modelskog ispitivanja

Prije modelskih ispitivanja potrebno je provesti analizu mogućih faktora koji bi utjecali na netočnost rezultata. Prema određenim ITTC procedurama provedbe pokusa otpora [5], a sa stajališta analize netočnosti, cijeli je sustav provedbe pokusa otpora i mjerenja podijeljen u 5 skupina:

1) geometrija - model se generira iz 2D nacrtu ili matematičkog opisa forme trupa i uvijek može doći do greške, budući ni jedan proces generiranja i izrade forme broda nije savršen. Pretpostavka je da geometrija modela može imati točnost ± 1 mm u smjeru svake koordinatne osi i ako ta tolerancija nije premašena nije potrebna dodatna analiza utjecaja netočnosti geometrije trupa. Također prilikom samog ispitivanja može doći do deformacije modela uslijed statičkih opterećenja. Poželjno je napraviti što veći model, koliko to dimenzije bazena dopuštaju, kako bi kasnija pogreška preračunavanja rezultata s modela na brod bila što manja.

Iako greška geometrije modela indirektno preko oplakane površine utječe na ukupni otpor modela, općenito ne postoji analitička formula koja to povezuje.

2) instalacija modela - utjecaj instalacije modela na mehanizam dinamometra za mjerenje otpora je vrlo složen i netočnosti se jedino mogu procijeniti iz pouzdanih serija podataka prijašnjih ispitivanja. Bilo kakve pogreške u postavljanju modela rezultirat će odstupanjima u mjerenju otpora, trimom ili nagibom modela.

3) kalibracija - sustav je prije ispitivanja potrebno kalibrirati odnosno usporediti mjerni sustav sa standardiziranim sustavom kako bi se smanjila sistemska pogreška.

Netočnosti kalibracije odnose se na termometar za mjerenje temperature vode u bazenu, na vagu za određivanje mase modela, senzorske uređaje, dinamometar za mjerenje otpora, uređaje za mjerenje trima itd. Ukupnu netočnost potrebno je odrediti procesom kalibracije neovisno o pokusu otpora. Podaci mjerenja se bilježe i direktno primjenjuju u pokusu otpora modela.

4) mjerenje - uz mjerenje otpora jedan od najvažnijih parametara u obradi podataka nakon ispitivanja modela je brzina. Kod većine kolica brzina je određena preko rotacije metalnog kola koje ima optički senzor (čiji se binarni izlaz koristi kao izvor impulsa) ili neki drugi uređaj koji generira impuls.

Također se tijekom ispitivanja mjeri bočni nagib i trim modela koji izravno utječu na oplakanu površinu trupa, a može ih uzrokovati nepravilno pozicioniranje odnosno instalacija modela. Posljedica toga je interakcija između bočnog nagiba i trima modela te sile otpora. No ne postoji analitička formula kojom bi se izrazila ta interakcija.

5) obrada podataka - kod provođenja analize netočnosti modelskog ispitivanja bilježe se svi izvori i komponente pogrešaka. Analizira se svaka komponenta posebno, pridaje joj se važnost i na koncu se određuje ukupna netočnost. No u većini slučajeva relevantne su samo dvije najvažnije komponente pomoću kojih se određuje ukupna netočnost određenog rezultata mjerenja. Važno je zbog jednostavnosti analize poznavati koje komponente su najvažnije za proračun, odnosno koje komponente se mogu zanemariti ako ne utječu uvelike na konačne rezultate.

Da bi se što točnije utvrdila netočnost mjerenja prema ITTC preporukama provodi se 5 setova ispitivanja pri 3 različite brzine odnosno ukupno 15 mjerenja. Na taj način uključuju se i neke nasumične pogreške koje nisu predviđene. Ukupna netočnost modelskog ispitivanja može dovesti

do odstupanja koeficijenta ukupnog otpora C_T za 0,67% ako se provodi više pokusa te 1,18% ako se provodi jedan pokus [5].

Ukupna netočnost ovisi o svim komponentama bazenskog ispitivanja i potrebno ju je uključiti u samo ispitivanje i obradu podataka.

4. Analiza utjecaja pogreške očitavanja oplakane površine na ukupni otpor

Analiziran je model izrađen u mjerilu $\lambda = 3,5$ m višenamjenske brodice ispitane u Brodarskom institutu u Zagrebu [6]. Osnovne karakteristike modela su:

- duljina između okomica $L_{PP} = 2,5237$ m
- duljina na vodnoj liniji $L_{WL} = 2,5460$ m
- širina na središnjem presijeku $B = 0,8306$ m
- gaz $T = 0,1686$ m
- oplakana površina na ravnoj vodnoj liniji $S = 2,0168$ m²
- volumen istisnine $\nabla = 0,1706$ m³
- koeficijent punoće forme $C_B = 0,4843$

Na temelju nacрта rebara modela generiran je 3D model pomoću programa Rhino 4.0. Nakon što su u prostoru modelirana sva rebra modela, generirane su 3D plohe koje ih povezuju. Trup ima V oblik rebara dna, zgib koji se proteže čitavom duljinom trupa te uronjeno ravno krmeno zrcalo na kojem se strujanje odvaja od trupa. Pri dovoljno visokim brzinama kod poludeplasmanskih i gliserskih formi na takvom krmenom zrcalu dolazi do tzv. čistog odvajanja strujanja i zrcalo je gotovo čitavo iznad površine vode. Daljnji proračun temelji se na toj pretpostavci.

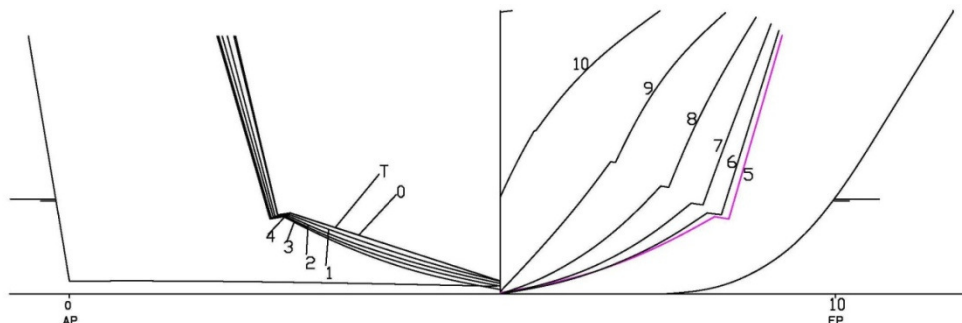


Fig. 2. Ship model body plan

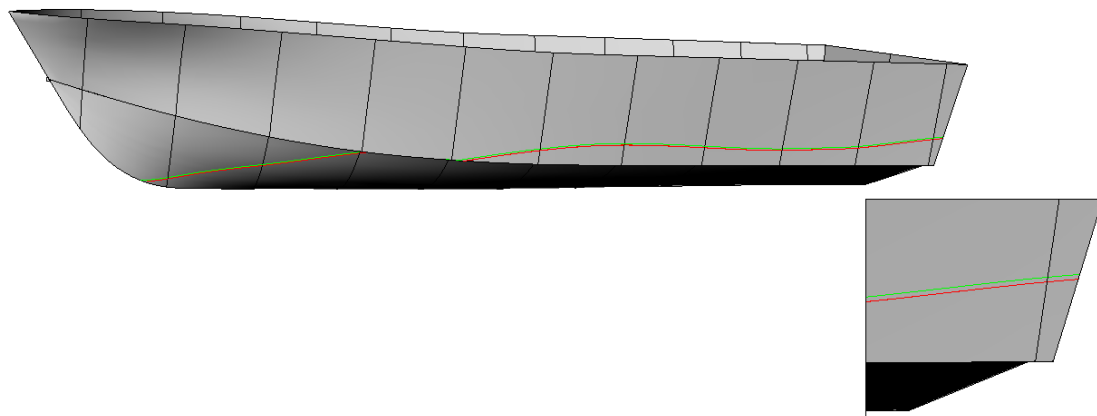
Slika 2. Nacrt rebara modela broda

Pomoću fotografija ispitivanja modela u bazenu za dvije različite brzine, ručno je određena vodna linija za svaku pojedinu brzinu te je projicirana na 3D model na način da je fotografija učitana u program kao bi se model postavio u točnu perspektivu fotografije s ispitivanja. Oplakana površina izračunata je pomoću naredbe "Surface area" programom Rhino 4.0 uz točnost od +2% u usporedbi s oplakanom površinom određenom prilikom bazenskog ispitivanja. Na Slikama 3. i 4. prikazane su fotografije snimljene za vrijeme ispitivanja modela pri brzinama $v_M = 5,002$ m/s i $v_M = 6,594$ m/s.

Za te dvije brzine razmotren je utjecaj pogreške očitavanja oplakane površine na način da je sustavno varirano očitavanje pomicanjem cijele vodne linije u vertikalnom smjeru za ± 20 mm s korakom od 5 mm te pomicanjem samo pramčanog dijela vodne linije kako bi se utvrdio značaj netočno očitavanja s nejasne slike uslijed pojave vodene prašine, Slika 5.

**Fig. 3.** Model testing at speed of $v_M = 5,002$ m/s**Slika 3.** Ispitivanje modela pri brzini $v_M = 5,002$ m/s**Fig. 4.** Model testing at speed of $v_M = 6,594$ m/s**Slika 4.** Ispitivanje modela pri brzini $v_M = 6,594$ m/s

Najprije je razmotren utjecaj za manju brzinu modela koja iznosi $v_M = 5,002$ m/s, odnosno brzinu broda $v_S = 9,352$ m/s (18,18 čv). Sila ukupnog otpora modela izmjerena u bazenu pri toj brzini iznosi $R_{T_M} = 258,36$ N. Isti proračun proveden je i za nešto veću brzinu modela $v_M = 6,594$ m/s, odnosno brzinu broda $v_S = 12,335$ m/s (23,98 čv). Sila ukupnog otpora modela izmjerena u bazenu pri toj brzini iznosi $R_{T_M} = 278,76$ N.

**Fig. 5.** Offsetted waterline by 5 mm**Slika 5.** Pomaknuta vodna linija za 5 mm

Vodna linija aproksimirana pomoću fotografija pretpostavljena je kao točna vodna linija koja se generira pri određenoj brzini. Samim time je i izračunata oplakana površina (uz odstupanje do +2%) pretpostavljena kao "mjerodavna" oplakana površina koja daje silu ukupnog otpora modela R_{T_M} na temelju rezultata mjerenja u bazenu:

$$R_{T_M} = 0,5 C_{T_M} \rho_M v_M^2 S_M \quad (1)$$

gdje je:

- C_{T_M} - koeficijent ukupnog otpora modela,
- ρ_M - gustoća vode u bazenu, kg/m³,
- v_M - brzina modela, m/s,
- S_M - oplakana površina modela, m².

Uz konstantnu brzinu modela i silu otpora izmjerenu pri ispitivanju određen je za "mjerodavnu" oplakanu površinu koeficijent ukupnog otpora modela. Zatim je isti koeficijent određen za svako očitavanje oplakane površine te su izračunata postotna odstupanja od koeficijenta ukupnog otpora modela za "mjerodavnu" oplakanu površinu prema izrazu:

$$p_{\%} = \left((x_{mj} - x_p) 100\% \right) / x_p \quad (2)$$

gdje je:

- $p_{\%}$ - postotna pogreška,
- x_{mj} - očitana vrijednost mjerne veličine,
- x_p - "mjerodavna vrijednost".

Koeficijent ukupnog otpora "mjerodavne" oplakane površine definiran je izrazom:

$$C_{T_{M0}} = R_{T_M} / (0,5 \rho_M v_M^2 S_M) \quad (3)$$

Izračunata odstupanja koeficijenta ukupnog otpora modela u odnosu na "mjerodavnu" oplakanu površinu pri pojedinim brzinama prikazana su na Slikama 6. i 7., a na Slici 8. dana je usporedba za obje brzine.

Isti proračun proveden je i za netočno očitavanje pramčanog dijela vodne linije te su rezultati prikazani na Slikama 9., 10. i 11.

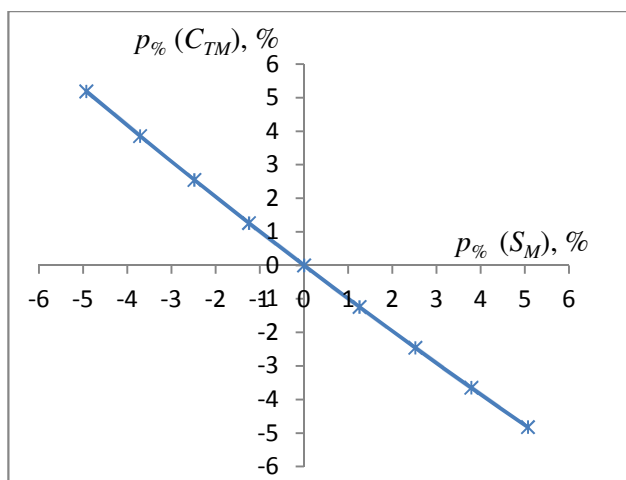


Fig. 6. Influence of inaccurate determination of the wetted surface area on C_{T_M} at $v_M = 5,002$ m/s

Slika 6. Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine na C_{T_M} pri $v_M = 5,002$ m/s

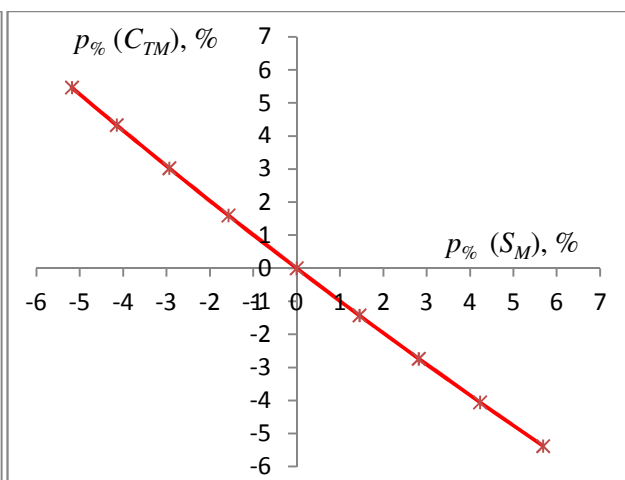


Fig. 7. Influence of inaccurate determination of the wetted surface area on C_{T_M} at $v_M = 6,594$ m/s

Slika 7. Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine na C_{T_M} pri $v_M = 6,594$ m/s

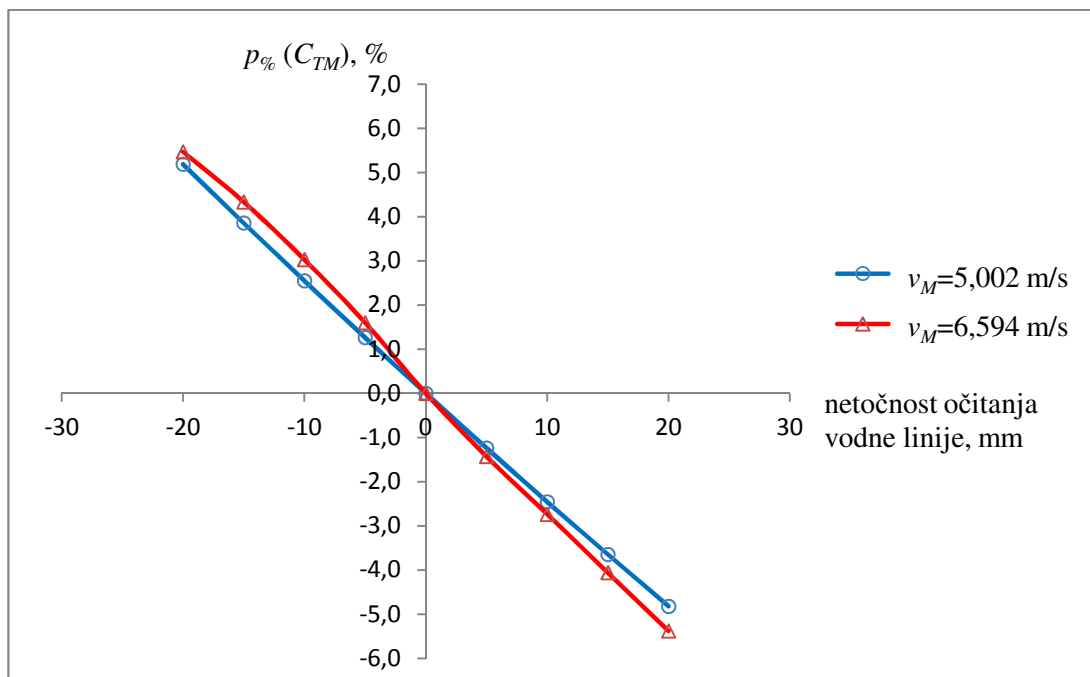


Fig. 8. Comparison of the influence of inaccurate waterline reading for two speeds

Slika 8. Usporedba utjecaja netočnosti očitavanja vodne linije za obje brzine

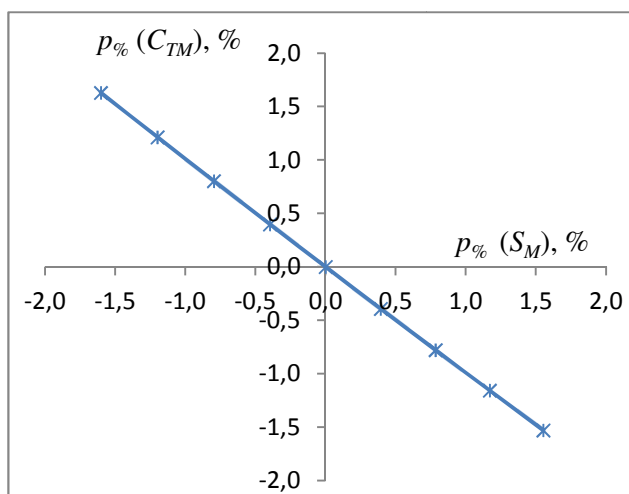


Fig. 9. Influence of inaccurate determination of bow part of the wetted surface on C_{TM} at

$v_M = 5,002$ m/s

Slika 9. Utjecaj netočnosti očitavanja pramčanog dijela oplakane površine na C_{TM} pri $v_M = 5,002$ m/s

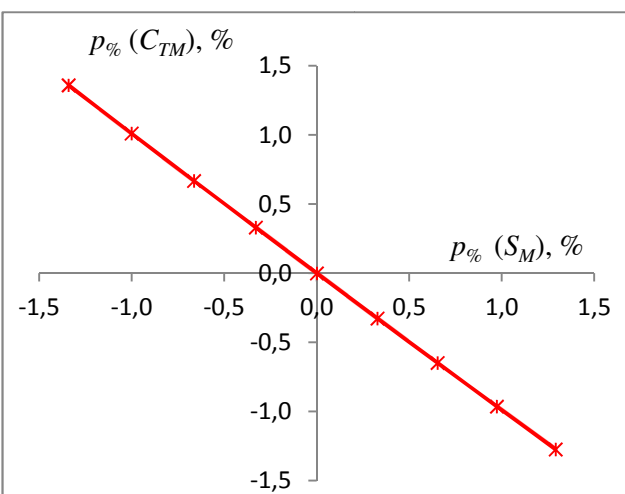


Fig. 10. Influence of inaccurate determination of bow part of the wetted surface on C_{TM} at

$v_M = 6,594$ m/s

Slika 10. Utjecaj netočnosti očitavanja pramčanog dijela oplakane površine na C_{TM} pri $v_M = 6,594$ m/s

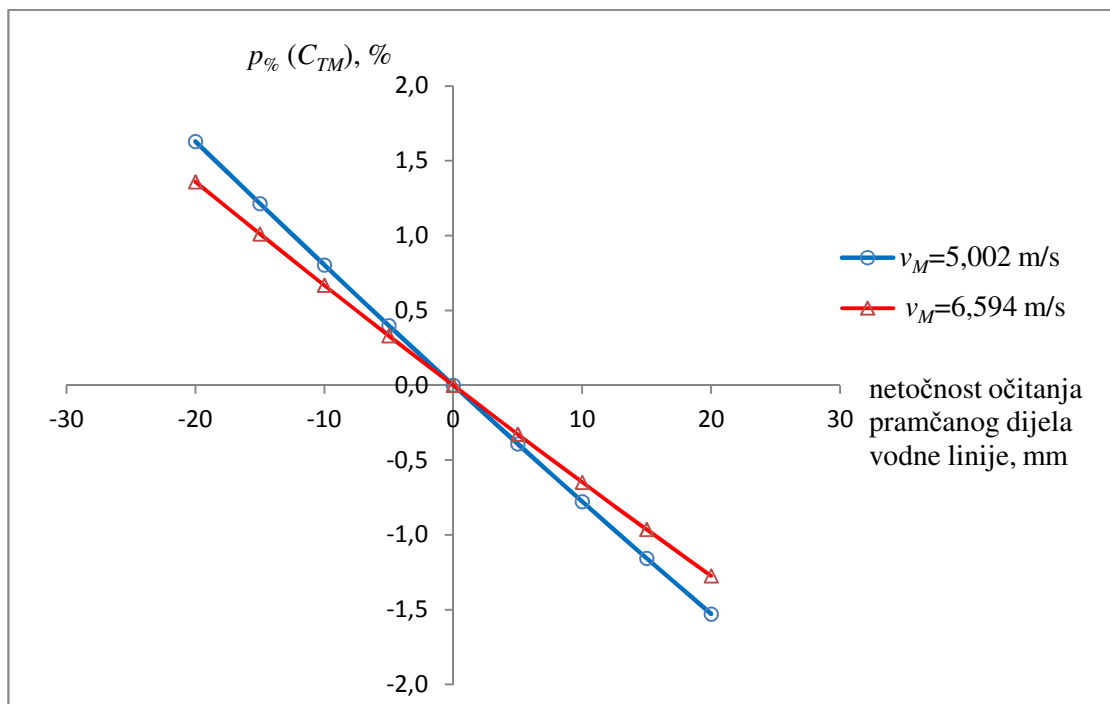


Fig. 11. Comparison of the influence of inaccurate bow part of the waterline reading for two speeds

Slika 11. Usporedba utjecaja netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije za obje brzine

5. Preračunavanje rezultata s modela na brod

Kako bi se odredio utjecaj koji će netočno očitavanje oplakane površine modela imati na rezultate za brod u naravi, rezultati su na temelju Froudeovog zakona sličnosti preračunati na brod pomoću izraza koji slijede. Najprije je izračunat koeficijent otpora trenja C_F modela prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC-57 kako bi se odredio C_R , odnosno koeficijent preostalog otpora koji je jednak za model i za brod:

$$C_{F_M} = 0,075 / \left((\log Re_M - 2)^2 \right) \quad (4)$$

gdje je Re_M Reynoldsov broj za model.

Na temelju koeficijenta C_F i koeficijenta ukupnog otpora modela definiranog za svako očitavanje oplakane površine određen je koeficijent preostalog otpora C_R koji je jednak za model i za brod:

$$C_{R_M} = C_{T_M} - C_{F_M} = C_{R_S} \quad (5)$$

Reynoldsov broj za brod definiran je na temelju brzine i duljine broda određenih pomoću geometrijske sličnosti modela i broda λ :

$$Re_S = (v_S L_S) / \nu_S \quad (6)$$

gdje je

- $v_S = v_M \sqrt{\lambda}$ - brzina broda, m/s,
- $L_S = L_M \lambda$ - duljina broda, m,

– ν_S - koeficijent kinematičke viskoznosti morske vode, m^2/s .

Koeficijent ukupnog otpora broda C_{T_S} uz konstantan korelacijski dodatak ΔC_T određuje se iz izraza:

$$C_{T_S} = C_{F_S} + C_{R_S} + \Delta C_T \quad (7)$$

gdje je koeficijent otpora trenja broda $C_{F_S} = 0,075 / ((\log Re_S - 2)^2)$.

Konačno, ukupni otpor broda R_{T_S} izračunat je pomoću slijedećeg izraza:

$$R_{T_S} = 0,5 C_{T_S} \rho_S \nu_S^2 S_S \quad (8)$$

gdje je ρ_S gustoća morske vode, a $S_S = \lambda^2 S_M$ dinamička oplakana površina broda.

Za razliku od koeficijenta ukupnog otpora broda i modela čija će netočnost biti izraženija pri većoj brzini, greška sile ukupnog otpora broda veća je pri manjoj brzini, Slika 12. Budući da se pri manjoj brzini mjere manje sile otpora modela moguće je da pogreška u mjerenju sile otpora bude veća. Nakon ekstrapolacije rezultata na brod vidljivo je da će iz tog razloga dinamička oplakana površina više utjecati na ukupni otpor pri manjim brzinama.

Može se zaključiti kako će netočno očitavanje vodne linije odnosno oplakane površine modela dati prihvatljiva odstupanja vrijednosti koeficijenata ukupnog otpora i oplakanih površina od "točnih" vrijednosti. Proračunom određivanja sile ukupnog otpora broda također je pokazano kako su odstupanja vrijednosti koeficijenata ukupnog otpora gotovo zanemarive. Pogreške vrijednosti oplakanih površina i koeficijenata ukupnog otpora broda suprotnog su predznaka te se stoga u izrazu za silu ukupnog otpora poništavaju.

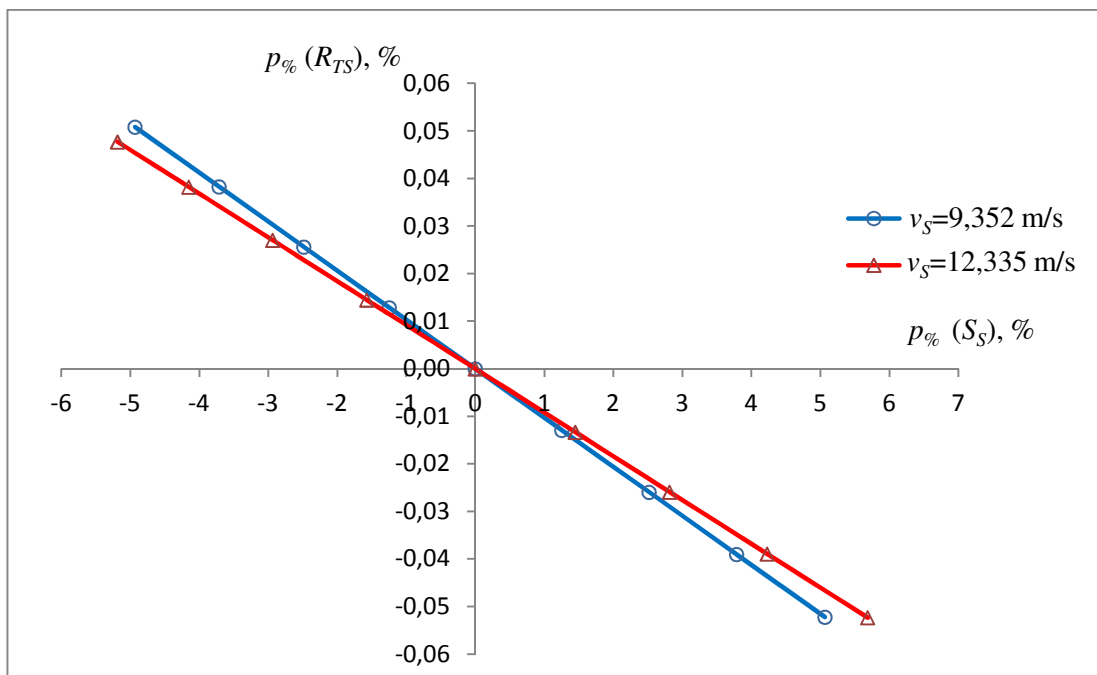


Fig. 12. Comparison of the influence of inaccurate wetted surface area determination on total ship resistance for two speeds

Slika 12. Usporedba utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine na ukupni otpor broda za dvije brzine

6. Zaključak

Iako dinamičke vrijednosti oplakane površine znatnije utječu na otpor deplasmanskih nego poludeplasmanskih i gliserskih formi, kako bi predviđene karakteristike otpora broda bile što točnije potrebno je i oplakanu površinu što točnije odrediti. Uobičajena metoda analize fotografija bazenskih ispitivanja daje zadovoljavajuće rezultate, a relativno male pogreške koje se mogu u tom procesu dogoditi ne utječu znatnije na rezultate. Iako postoje brojni algoritmi i računalni programi koji uvelike olakšavaju sam proces analize fotografija, veliki utjecaj na točnost očitavanja ima stručnost i iskustvo osobe koja to radi.

Kod poludeplasmanskih formi trupa broda pogreška u očitavanju dinamičke oplakane površine s porastom brzine imat će sve veći utjecaj na koeficijent ukupnog otpora modela. Drugim riječima netočno očitavanje vodne linije pri većim će brzinama uzrokovati veću pogrešku očitane oplakane površine modela.

Ekstrapolacijom rezultata na brod vidljivo je da dinamička oplakana površina ima veći utjecaj na ukupni otpor pri manjim brzinama. Obzirom da su sile otpora pri manjim brzinama manje, vrijednost oplakane površine imat će veći utjecaj na ukupnu pogrešku. Preostali otpor čini gotovo 80 % ukupnog otpora broda te pogreške u očitavanju oplakane površine koje utječu na otpor trenja broda neće imati veliki utjecaj na netočnost ukupnog otpora broda. Postotak netočnog očitavanja oplakane površine približan je postotku odstupanja koeficijenta ukupnog otpora broda nakon ekstrapolacije rezultata, stoga se prilikom izračuna sile ukupnog otpora broda odstupanja međusobno poništavaju.

Zahvala

Ovaj rad sufinanciralo je Sveučilište u Zagrebu, kratkoročnom financijskom potporom istraživanju (Potpora istraživanju 1 za 2013./2014. godinu) pod naslovom "Sigurnost tegljenja pomorskih objekata na valovitom moru" te Hrvatska zaklada za znanost projektom 8658.

Literatura

- [1] ALLENSTRÖM, B., CHODOROWSKI, A., RAMBECH, H.J., TUKKER, J.: "Determination of wetted surface", ATM'09 Proceedings – The 1st International Conference on Advanced Model Measurement Technology for the EU Maritime Industry, Nantes, 2009.
- [2] Wikipedia – Live-wire Segmentation Technique (www.wikipedia.org/wiki/Livewire_Segmentation_Technique)
- [3] Wikipedia – Sobel operator (www.wikipedia.org/wiki/Sobel_operator)
- [4] PEREZ-MACIAS MARTIN, J. M., "Estimating wetted area of a model-hull from a set of camera images using, NURBS curves and surface", M.Sc. Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2009.
- [5] ITTC Recommended Procedures and Guidelines, <http://itc.sname.org/>
- [6] ..., "Mjerenja otpora i propulzije višenamjenske brodice", Interni izvještaj, Brodarski institut, Zagreb, 1997.